ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES,
ECOLES NATIONALES SUPERIEURES DE L'AERONAUTIQUE ET DE L'ESPACE,
DE TECHNIQUES AVANCEES, DES TELECOMMUNICATIONS,
DES MINES DE PARIS, DES MINES DE SAINT-ETIENNE, DES MINES DE NANCY,
DES TELECOMMUNICATIONS DE BRETAGNE,
ECOLE POLYTECHNIQUE (FILIERE TSI)

CONCOURS D'ADMISSION 2004

EPREUVE DE SCIENCES INDUSTRIELLES

Filière : MP

(Durée de l'épreuve : 3 HEURES)

Sujet mis à la disposition des concours : CYCLE INTERNATIONAL, ENSTIM, INT, TPE-EIVP

Cette épreuve comporte 16 *pages de texte (6 pages d'énoncé, une fiche technique de 1 page et 9 pages de documents annexes) et un document-réponse de 10 pages.*
Il est conseillé de lire la totalité de l'énoncé avant de commencer l'épreuve.
Si au cours de l'épreuve le candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.
Les questions sont organisées au sein d'une progression logique. Il est donc préférable de les traiter dans l'ordre proposé. Toutefois, ce sujet comporte plusieurs parties indépendantes.
L'usage d'ordinateur et de calculatrice est interdit.
Les calculs numériques seront faits « à la main » avec une précision de ± 10 %.

Robot de pose de fibres optiques

PRESENTATION DU SYSTEME

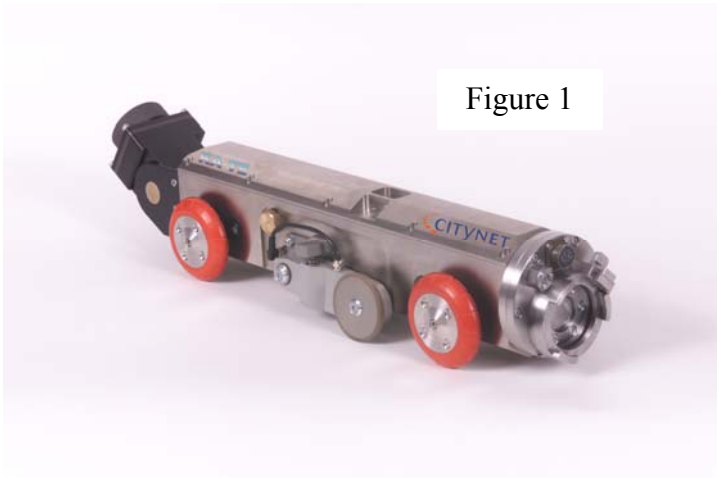


Figure 1

L'installation des réseaux souterrains de télécommunication par fibres optiques nécessite d'importants travaux de voirie :

- découpe de la chaussée
- creusement de tranchées
- pose des canalisations
- réhabilitation de la chaussée.

Outre le prix de revient important de l'opération, cette technique provoque une gêne évidente au niveau de la circulation urbaine.

La société suisse KA-TE SYSTEM propose une solution originale pour éviter ces inconvénients.

Il s'agit d'emprunter les canalisations existantes (égouts) et de confier la mise en place des fibres optiques à un robot.

Ce procédé permet l'installation de 150 à 200 m de fibre par jour, raccordement aux habitations compris.

Suivant l'opération à réaliser, le robot est équipé du module adapté :

Exemple 1 : Robot équipé du module de pose des arceaux.

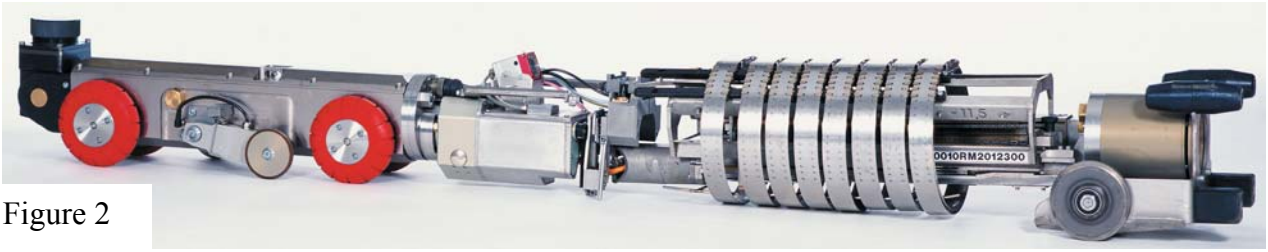


Figure 2

Exemple 2 : Robot équipé du module de pose des gaines.

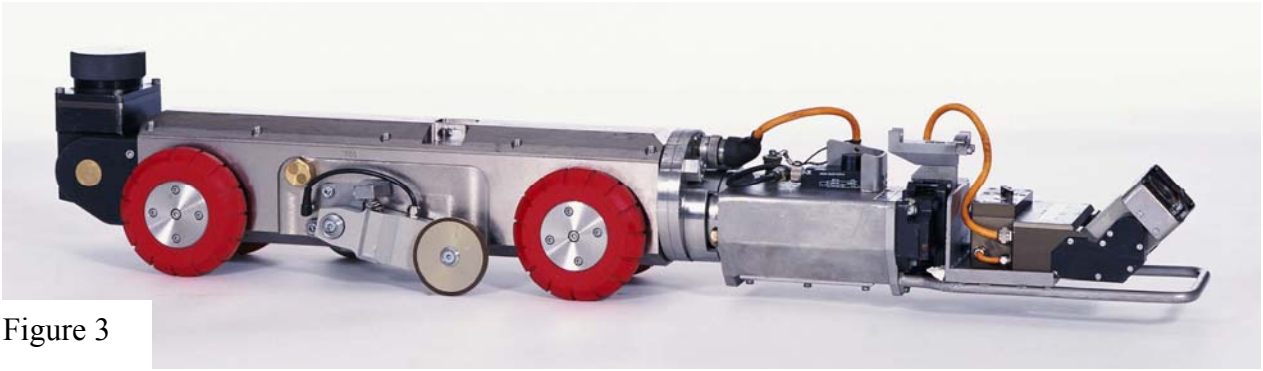


Figure 3

Chaque module est muni d'une caméra permettant la surveillance du bon déroulement des opérations.

MODE OPERATOIRE

Figure 4

Le principe de l'installation est de fixer à intervalles réguliers des arceaux métalliques (voir fiche technique) munis de clips dans lesquels seront placées des gaines en plastique. Les fibres optiques seront ensuite introduites manuellement dans les gaines.

Le robot est introduit dans la canalisation par un puits (figure 4).

- **Première phase :** Nettoyage de la canalisation.

Cette opération est réalisée à l'aide d'un jet d'eau à haute pression.

- **Deuxième phase :** Repérage de la position des canalisations de raccordement aux habitations.

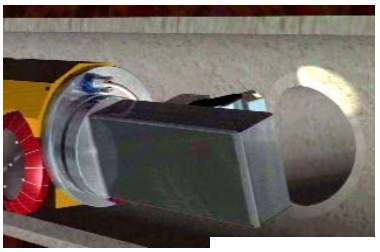


Figure 5

Le module équipant le robot possède, en plus de la caméra de surveillance, une caméra montée sur un support pivotant de façon à repérer les arrivées des canalisations latérales venant des habitations (figure 5). Cette opération permettra par la suite une égale répartition des points d'attache des fibres dans la canalisation principale. La distance entre deux points d'attache doit être de l'ordre de 1,5 m.

- **Troisième phase :** Mise en place des arceaux de fixation des fibres.
(Voir la description des brides sur la fiche technique.)

Le robot se déplace suivant l'axe de la canalisation jusqu'à la position calculée au cours de la deuxième phase.

- **Sous-phase 1 :** Déploiement des bras de centrage du robot.

Les canalisations rencontrées ont un diamètre compris entre 200 et 700 mm. De façon à centrer le robot dans la canalisation lors de la pose des arceaux, celui-ci possède quatre bras articulés.

La figure 6 montre les bras en position repos.

La figure 7 montre les bras en cours de déploiement.

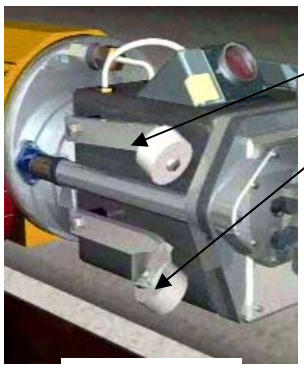


Figure 6

Figure 7

- **Sous-phase 2 :** Déroulement de la bride.

Situation initiale

L'outil de déroulement saisit la bride.

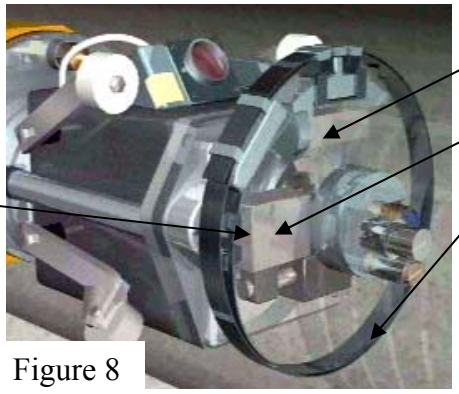


Figure 8

Situation en fin de déroulement

Translation de l'outil de sertissage.

Rotation de l'outil de déroulement

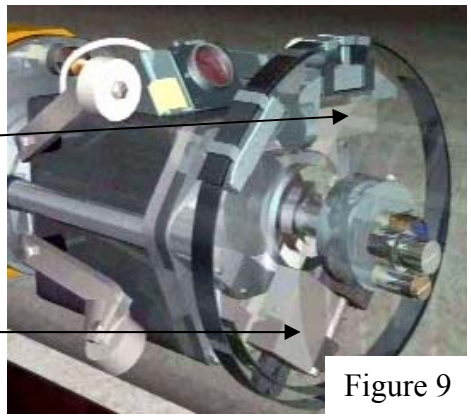


Figure 9

Figure 10

- **Sous-phase 3 :** Sertissage de la bride.

Translation de la tige du vérin de sertissage

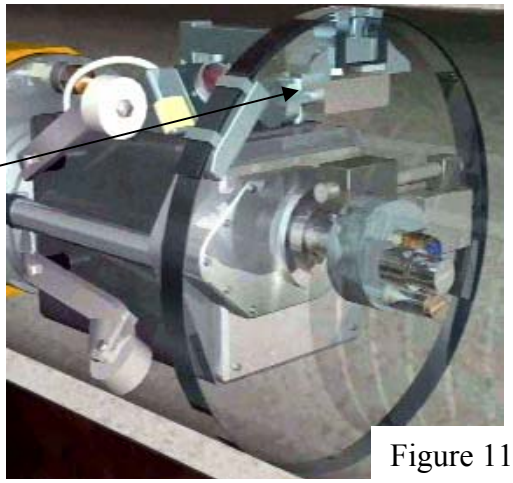


Figure 11

- **Sous-phase 4 :** Retour en position initiale des outils de déroulement et de sertissage.

- **Sous-phase 5 :** Rentrée des bras de centrage.

- **Quatrième phase :** Fixation des gaines en plastique sur les brides.

Les clips de fixation des gaines sont déjà sur les brides.

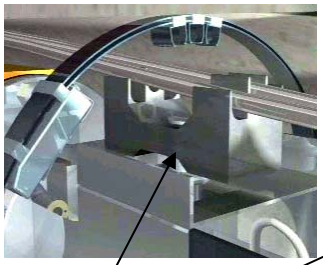


Figure 12

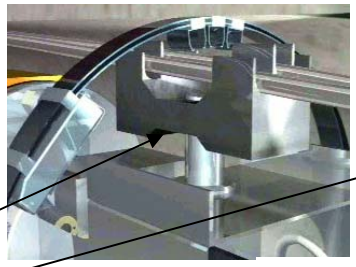


Figure 13

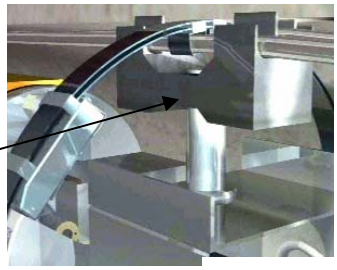


Figure 14

Translation de l'outil de pose des gaines pour fibres optiques.

- **Cinquième phase :** Mise en place des fibres optiques dans les gaines.

Cette opération se fait manuellement.

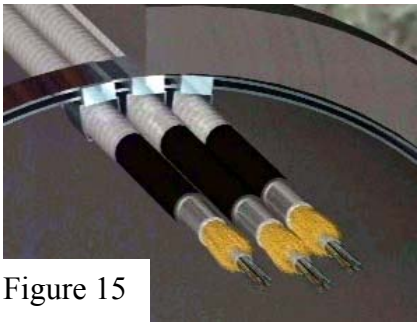


Figure 15

- **Sixième phase :** Raccordement aux habitations.

TRAVAIL DEMANDE

I - ANALYSE FONCTIONNELLE.

Objectif : Associer les fonctions techniques nécessaires à la réalisation de la fonction globale et les solutions techniques assurant ces fonctions, en utilisant l'outil de description fonctionnelle FAST.

Question 1 : Identification des fonctions techniques - En utilisant le mode d'emploi du robot, défini dans le mode opératoire et la fiche technique, compléter le diagramme FAST donné en annexe **1** en faisant apparaître les fonctions manquantes ainsi que les solutions techniques associées à ces fonctions.

II - VERIFICATION DES PERFORMANCES.

Objectif : Vérifier certaines performances du système en utilisant les outils de la mécanique et de l'automatique.

II - 1 : Motorisation du robot.

Le concepteur a fait le choix de deux essieux moteurs entraînés par un seul moteur électrique. Un essieu est constitué d'un axe et de deux roues en liaison encastrement avec l'axe. La réduction de la vitesse de rotation du moteur est assurée par un réducteur épicycloïdal et un réducteur à engrenage conique (voir annexe **2**).

Question 2 : Etude du réducteur épicycloïdal - Après avoir déterminé la vitesse de rotation du moteur ω_m, calculer le nombre de dents des pignons du réducteur épicycloïdal.

II - 2 : Direction du robot.

Le concepteur a fait le choix de deux essieux de direction fixe par rapport au châssis du robot. Le glissement des roues au contact avec la paroie de la canalisation ramenera le robot dans l'axe de la canalisation lorsqu'il s'en écartera.

Question 3 : Comportement du robot dans la canalisation - Par une étude statique, déterminer l'inclinaison maximum du robot. L'étude sera conduite en utilisant la modélisation et le paramétrage proposés en annexe **3**. Conclure quant au respect du cahier des charges. Analyser l'influence des paramètres intervenant dans l'étude.

II - 3 : Positionnement des arceaux métalliques.

La deuxième phase décrite dans le mode d'emploi du robot indique une volonté de répartir uniformément les arceaux entre deux points de raccordement aux habitations. Pour cela, le déplacement du robot est asservi selon la modèlisation et le paramétrage proposés en annexe **4**.

<u>Question 4</u> : Réglage de l'asservissement - Représenter l'asservissement de déplacement du robot sous la forme d'un schéma-blocs, et déterminer les valeurs de certains paramètres de l'asservissement de façon à obtenir la rapidité et la stabilité demandées par le cahier des charges.

II - 4 : Centrage du robot.

De façon à pouvoir dérouler les arceaux métalliques, le chariot est centré dans la canalisation à l'aide de quatre bras actionnés par un vérin hydraulique.

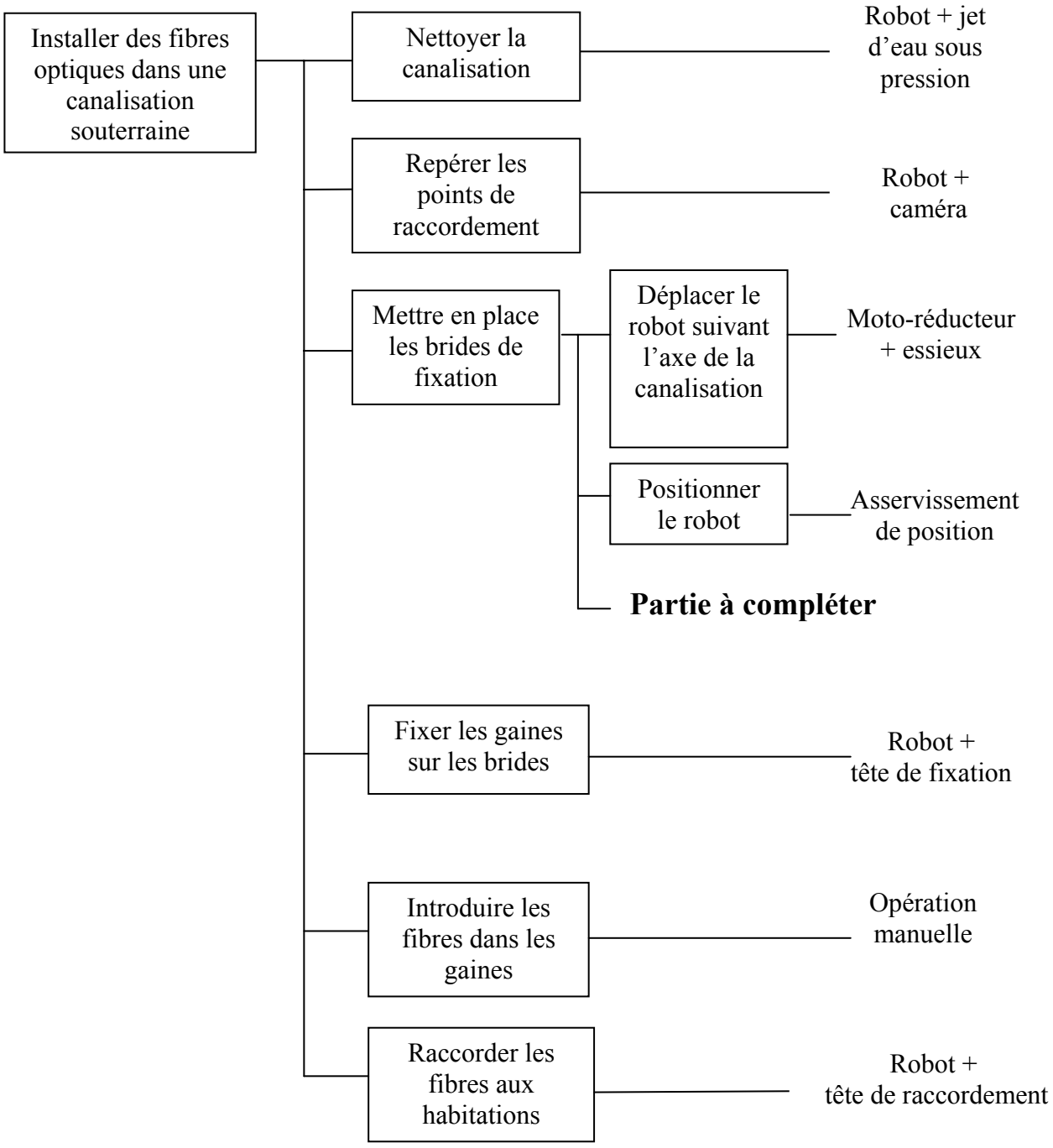
<u>Question 5</u> : Centrage du robot dans la canalisation - Par une étude cinématique, déterminer la course de la tige du vérin de commande des bras de centrage ainsi que la vitesse des extrémités des bras inférieurs lorsqu'ils viennent en contact avec la canalisation. L'étude sera conduite en utilisant la modélisation et le paramétrage proposés en annexe **<u>5</u>**.

<u>Question 6</u> : Comportement dynamique du robot - En utilisant la modèlisation et le paramétrage proposés en annexe **<u>6</u>**, déterminer par une étude dynamique la relation entre l'effort F du vérin sur les bras et les paramètres de mouvement.

<u>Question 7</u> : Action exercée par le vérin - Pour chaque diagramme donné en annexe **<u>6</u>**, analyser le comportement du robot. Déterminer les vitesses $\dot{\delta}$ en fin de course. En déduire les valeurs de F respectant le cahier des charges.

ANNEXE 1

Représentation fonctionnelle


Installer des fibres optiques dans une canalisation souterraine
Nettoyer la canalisation
Robot + jet d'eau sous pression
Repérer les points de raccordement
Robot + caméra
Mettre en place les brides de fixation
Déplacer le robot suivant l'axe de la canalisation
Moto-réducteur + essieux
Positionner le robot
Asservissement de position
Partie à compléter
Fixer les gaines sur les brides
Robot + tête de fixation
Introduire les fibres dans les gaines
Opération manuelle
Raccorder les fibres aux habitations
Robot + tête de raccordement

Question 1 : En utilisant le mode d'emploi du robot, compléter le diagramme FAST donné ci-dessus en faisant apparaître les fonctions manquantes ainsi que les solutions techniques associées à ces fonctions.

ANNEXE 2

Motorisation du robot

Le schéma cinématique ci-dessous présente l'architecture de la transmission du robot. Le concepteur a fait le choix de deux essieux moteurs entraînés par un seul moteur électrique. Un essieu est constitué d'un axe et de deux roues en liaison encastrement avec l'axe. La vitesse de rotation des roues est définie par ω_{roue}.

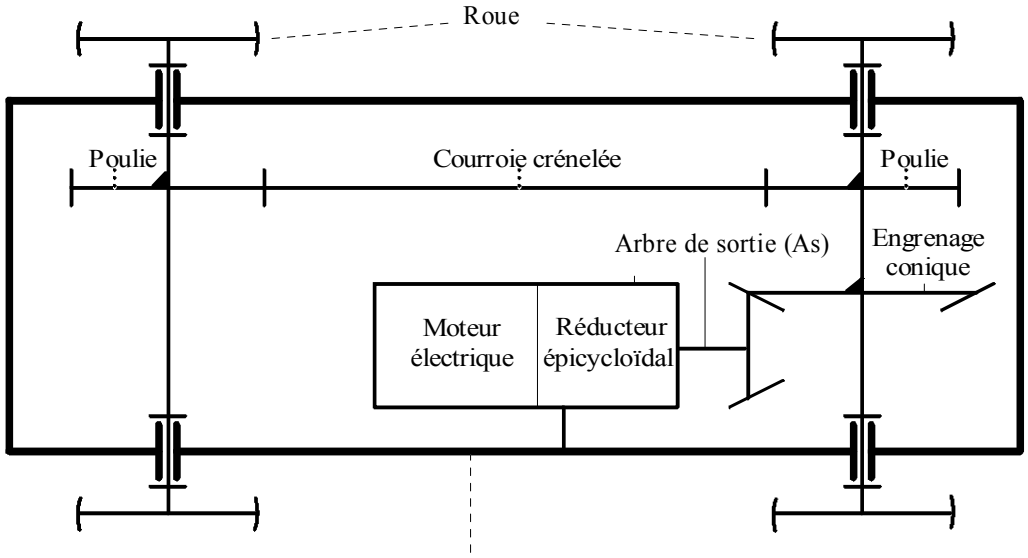


Figure 22 Le châssis du chariot est représenté en traits forts

La réduction de la vitesse de rotation du moteur électrique (ω_{moteur}) est assurée par un réducteur épicycloïdal et un réducteur à engrenage conique.

Etude du réducteur épicycloïdal

Données :

- vitesse de déplacement du chariot :
  v = 0,3 m/s
- diamètre des roues : d_R = 0,14 m

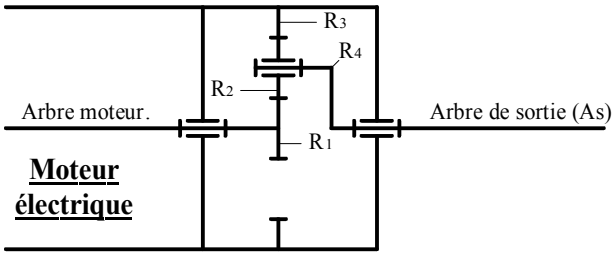


Schéma cinématique du réducteur épicycloïdal

- rapport de vitesse global :
$$k = \frac{\omega_{roue}}{\omega_{moteur}} = 0,2$$
- rapport du réducteur à engrenage conique : k_c = 0,8
- nombre de dents du pignon R_1 : Z_1=15 dents

Question 2 : Après avoir déterminé la vitesse de rotation du moteur, calculer les nombres de dents des pignons R_2 et R_3 du réducteur épicycloïdal.

ANNEXE 3

Direction du robot.

Le robot possède deux essieux rigides non orientables. Si le système est parfait (géométrie et contact), l'axe du robot se trouve dans le plan de symétrie vertical de la canalisation lorsque celle-ci est rectiligne. De part les défauts de géométrie et de contact, le robot prend une orientation légèrement différente et monte sur la paroi de la canalisation jusqu'au moment où il va glisser pour revenir au fond de celle-ci. Ce comportement sera identique lorsqu'il y aura un changement d'orientation de l'axe de la canalisation.

Hypothèses :

- En position initiale, l'axe $G\vec{x}$ du robot est parallèle à l'axe de la canalisation $\vec{x}_0$ et contenu dans le plan $\vec{x}_0\vec{y}_0$ (voir figure 25).
- Les quatre roues sont en contact avec la canalisation.
- L'étude sera menée dans le plan P, perpendiculaire à l'axe de la canalisation, et contenant le centre de gravité G du robot.
- Les points A et B représentent les contacts des roues avec le sol ramenés dans le plan de l'étude. (*Voir schémas ci-contre).*
- Les contacts en A et B sont des contacts ponctuels avec frottement.

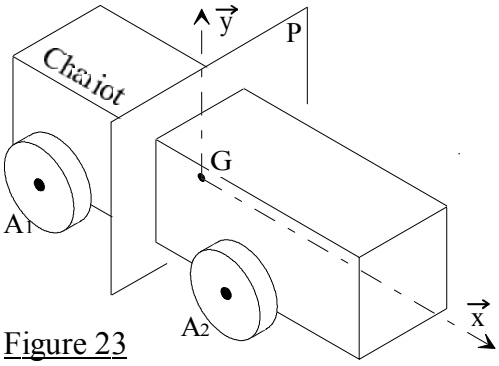


Figure 23

Données :

- Coefficient de frottement en A et B : $f = tg(\varphi) = 0,2$ ce qui correspond à un angle $\varphi = 11,3°$.
- Distance entre les points de contact : a = 0,12 m
- Rayon de la canalisation : R = 0,25 m
- Position du centre de gravité G : HG = 0,06 m (H est le milieu de AB).
- G_1 est la position limite du centre de gravité G. (voir figure 25)
- α est l'inclinaison maximum du robot.

Nota : Ces éléments ont été placés sur le schéma pour faciliter la compréhension de la question posée mais la valeur de α n'est pas la valeur réelle.

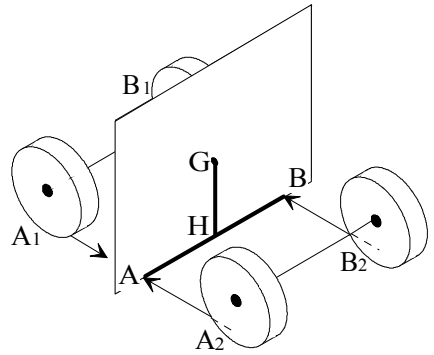
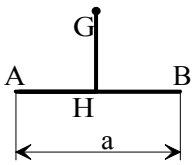


Figure 24



Cahier des charges :

L'inclinaison α du robot doit rester inférieure à 20°.

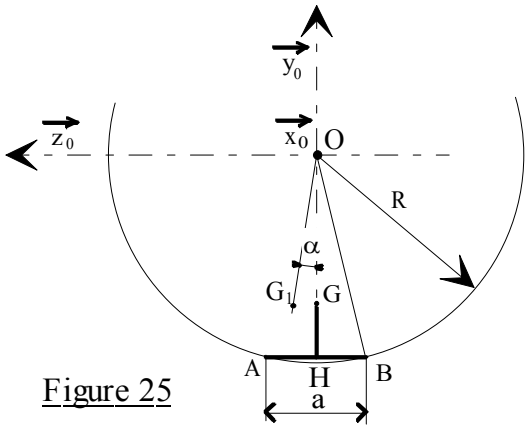


Figure 25

Question 3 : Par une étude statique, déterminer l'inclinaison maximum α du robot. L'étude sera conduite en utilisant la modélisation et le paramétrage proposés. Conclure quant au respect du cahier des charges. Analyser l'influence des paramètres φ et HG intervenant dans l'étude.

Conseil : Une résolution graphique est fortement conseillée. (prendre une échelle de 0,3)

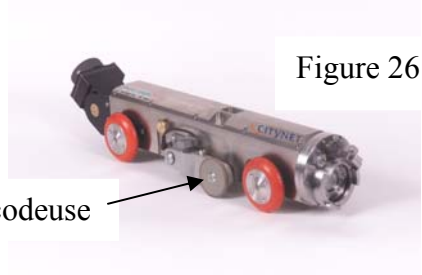
Pour les inconditionnels du calcul, signalons les valeurs suivantes :

Arcsin(0,24)=13,89° - tg(87,41°)=22,11 - tg(64,81°)=2,12
tg(10°)=0,176 - tg(13°)=0,23 - tg(16°)=0,286
tg(19°)=0,344 - tg(22°)=0,4 - tg(25°)=0,466

ANNEXE 4 – Page 1 / 3

Positionnement des arceaux.

Figure 26



Le déplacement en translation du chariot est asservi de façon à respecter l'écartement des arceaux.

Cahier des charges :

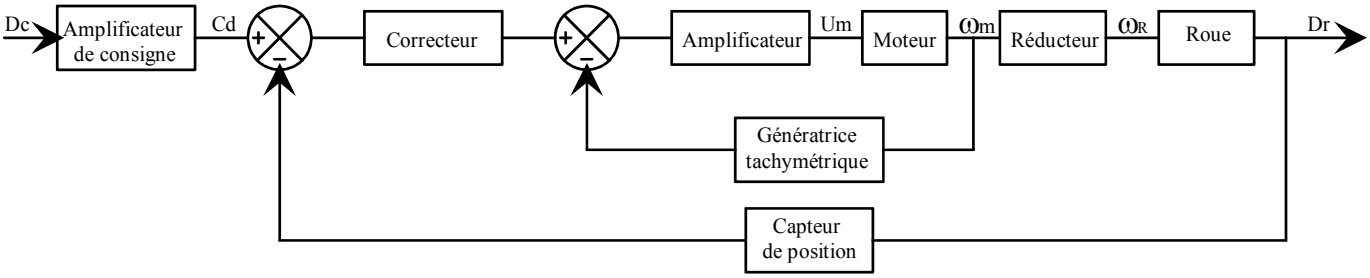
- Répartir les brides à égales distances les unes des autres entre deux raccords avec les habitations. Ecart optimal = 1,5 m.
- Rapidité optimale de la boucle de vitesse.
- Stabilité de l'asservissement de déplacement donnée par une marge de phase de 50°.
- Précision : aucun critère.

Mode opératoire :

- Le chariot muni d'une caméra placée sur une tête pivotante explore la canalisation et repère les arrivées de câbles venant des habitations.
- La roue centrale qui sert de capteur de déplacement permet de déterminer la distance entre chaque arrivée de câble.
- Ces distances permettent de déterminer le nombre de brides nécessaires et leur position pour respecter le cahier des charges.
- Ces positions serviront de consigne de déplacement lors de la mise en place des brides.

Modélisation :

L'asservissement de déplacement est représenté par le schéma d'architecture suivant :



Dc représente la consigne de déplacement en mètres.
Cd représente la tension en volts correspondant à la consigne de déplacement.
Dr représente le déplacement réel en mètres.
Um représente la tension d'alimentation du moteur.
ω_m représente la vitesse de rotation du moteur.
ω_R représente la vitesse de rotation à la sortie du réducteur.

Données :

- Fonction de transfert du moteur : $M(p) = \dfrac{7}{1 + 30.J_{eq}.p + 0{,}05.J_{eq}.p^2}$

Dans cette expression J_{eq} représente l'inertie équivalente du chariot ramenée à l'axe du moteur.

- Fonction de transfert de l'amplificateur : A

- Fonction de transfert du correcteur proportionnel : C(p) = C
- Rapport de réduction du réducteur : k = 0,2
- Diamètre de la roue codeuse : $d_C = 0,1$ m
- Diamètre des roues du robot : $d_R = 0,14$ m
- Moment d'inertie du rotor du moteur : $J_m = 5.10^{-3}$ kg.m^2
- Masse du robot : $M_R = 25$ kg
- Fonction de transfert de la génératrice tachymétrique : Kgt = 1 V/rd.s^{-1}
- Fonction de transfert du capteur de position : Kp
- Fonction de transfert de l'amplificateur de consigne : Kc

Hypothèses :

- Kp = Kc.
- Pour le calcul du moment d'inertie équivalent ramené à l'axe du moteur seuls seront pris en compte le moment d'inertie du rotor du moteur et la masse du robot.
- La fonction de transfert en boucle ouverte non corrigée de l'asservissement de position sera prise égale à $H(p) = \frac{1}{p(1+7.10^{-3}p+2,5.10^{-5}p^2)}$ quel que soit le résultat obtenu pour la valeur de A. Cette fonction de transfert correspond à une architecture différente (module embarqué) du robot.

Question 4 : Représenter l'asservissement de déplacement du chariot sous la forme d'un schéma-blocs, et déterminer les valeurs à donner à A pour avoir un réglage optimal de la boucle de vitesse, ainsi qu'à C pour respecter les conditions de stabilité données par le cahier des charges.

NOTA : Le réglage optimal de la boucle de vitesse correspond à un temps de réponse à 5% minimal.

Réponses fréquentielles d'un système du deuxième ordre

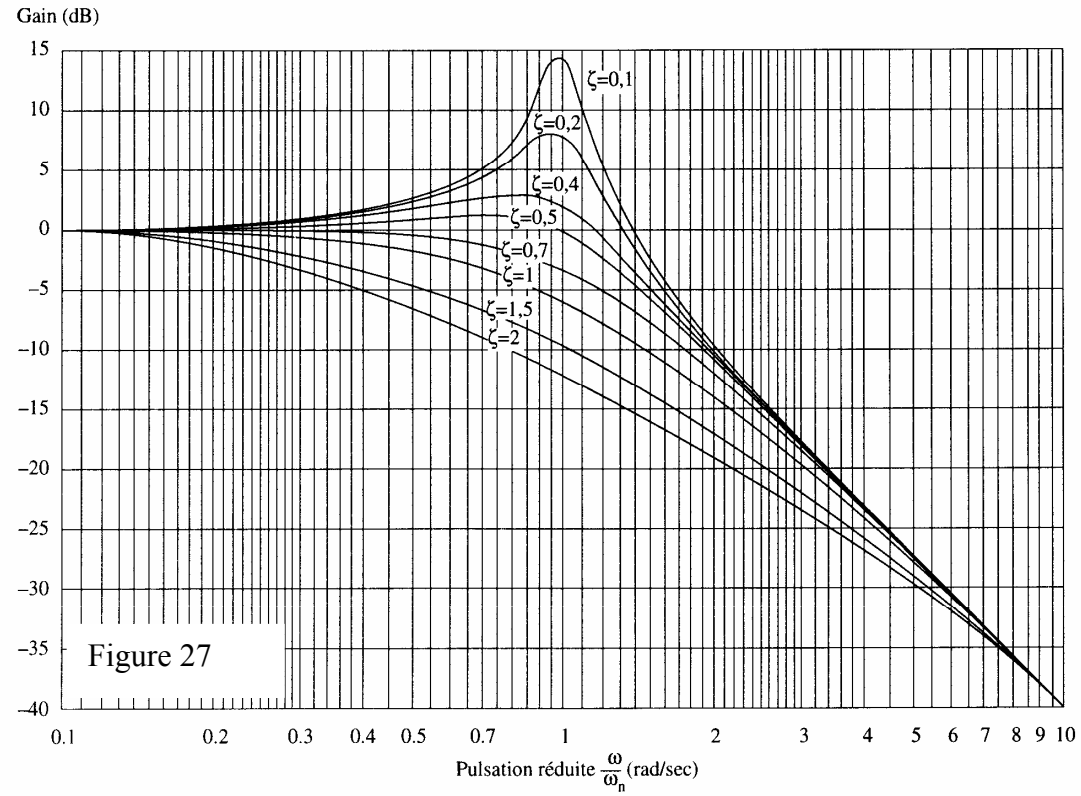


Figure 27

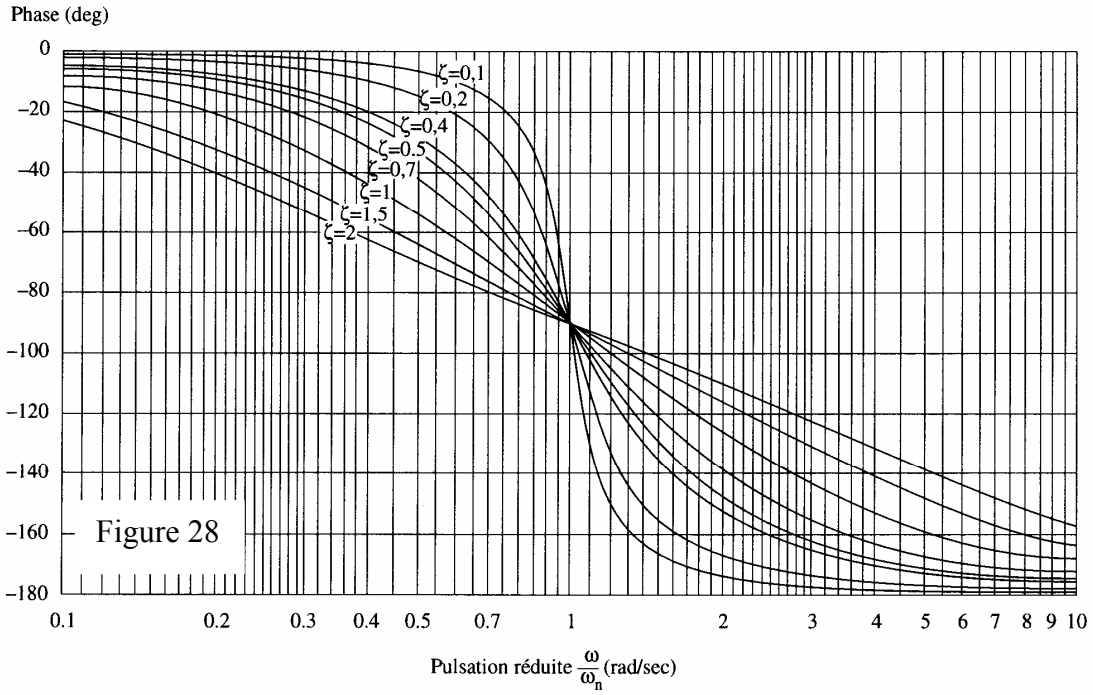


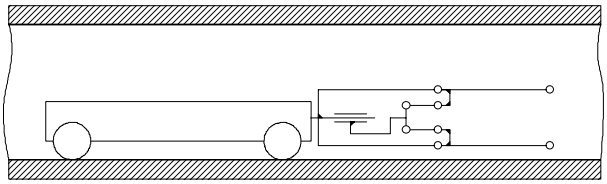
Figure 28

ANNEXE 5

Centrage du robot - Etude cinématique

Le positionnement des arceaux métalliques doit se faire en centrant le robot dans les canalisations à l'aide de quatre bras actionnés par un vérin hydraulique.

Lorsque le robot se déplace dans les canalisations, les quatre bras sont horizontaux.



A l'instant où le vérin commence à agir sur les bras, le dispositif est modélisé et orienté selon le schéma ci-contre. Il comprend :
- Un corps de vérin **1** solidaire du chariot **0**.
- Une tige de vérin **2**

Sur chacun des quatre bras :
- Une biellette **3** ……..BC
- Un levier **4** ……CDE
- Une roulette **5** en E de rayon négligeable.

Les liaisons en B, C, D, et E sont des pivots parfaits.

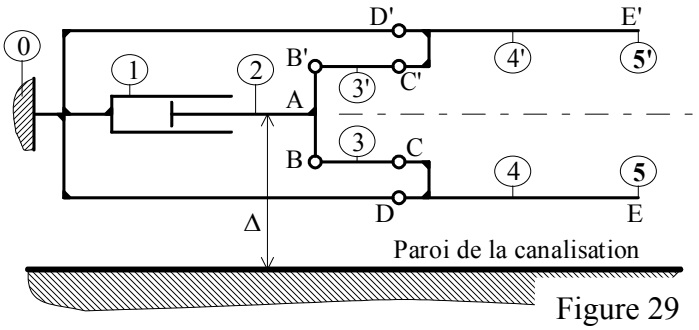
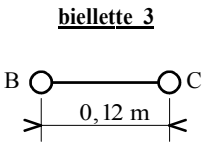


Figure 29

A l'endroit où un arceau métallique doit être posé, le robot s'immobilise, les deux roues du train arrière sont immobilisées par rapport au robot, et les quatre bras s'écartent sous l'action d'un vérin.

L'étude cinématique à réaliser consiste à étudier le comportement du mécanisme entre l'instant t_0 où le vérin commence à agir et l'instant t_1 où les deux roulettes inférieures touchent la paroi de la canalisation. On déterminera ainsi la vitesse en E des leviers **4** à cet instant t_1 pour faire un calcul de résistance au choc du mécanisme (non demandé dans cette étude).

Afin de diminuer le temps de mise en place du robot, le concepteur a décidé de déplacer la tige **2** du vérin selon un mouvement de translation rectiligne uniforme.



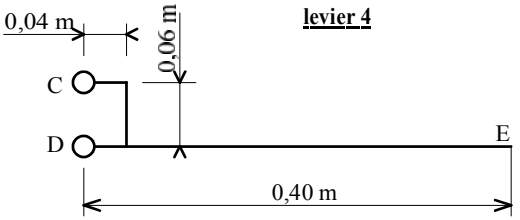


Figure 30

Pour faciliter l'étude, les quatre bras sont projetés sur le plan de symétrie du mécanisme.

Données numériques :

AB = 0,06 m

Δ = 0,30 m

Vitesse de la tige **2** du vérin par rapport au corps entre t_0 et t_1 : $\vec{V}_{A\in 2/0}=0{,}015\,\vec{x}_0$ (m/s)

Question 5 : Par une étude cinématique, déterminer la course de la tige du vérin de commande des bras de centrage ainsi que la vitesse des extrémités des bras inférieurs lorsqu'ils viennent en contact avec la canalisation.

Nota : Les résolutions graphiques éventuelles se feront sur le document réponse.
(échelle : 0,2)

ANNEXE 6 – Page 1 / 2

Centrage du robot - Etude dynamique

Afin de valider le choix du vérin, et donc sa puissance, il faut déterminer l'action F du vérin qui permettra au robot de se positionner correctement dans la canalisation.

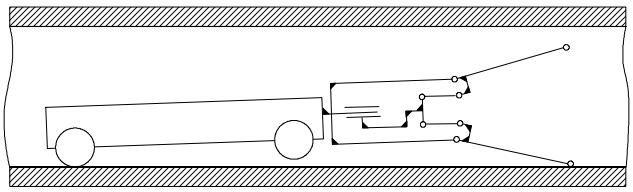


Figure 31

A l'instant où un anneau métallique doit être installé, les roues du train arrière sont bloquées par rapport au chariot. Sous l'effet d'un vérin, les bras inférieurs vont soulever le robot qui va pivoter sur son train arrière. La fin du positionnement sera assurée lorsque les roulettes des bras supérieurs viendront en contact avec la paroi de la canalisation.

A un instant « t », le système est modélisé selon le schéma ci-dessous :

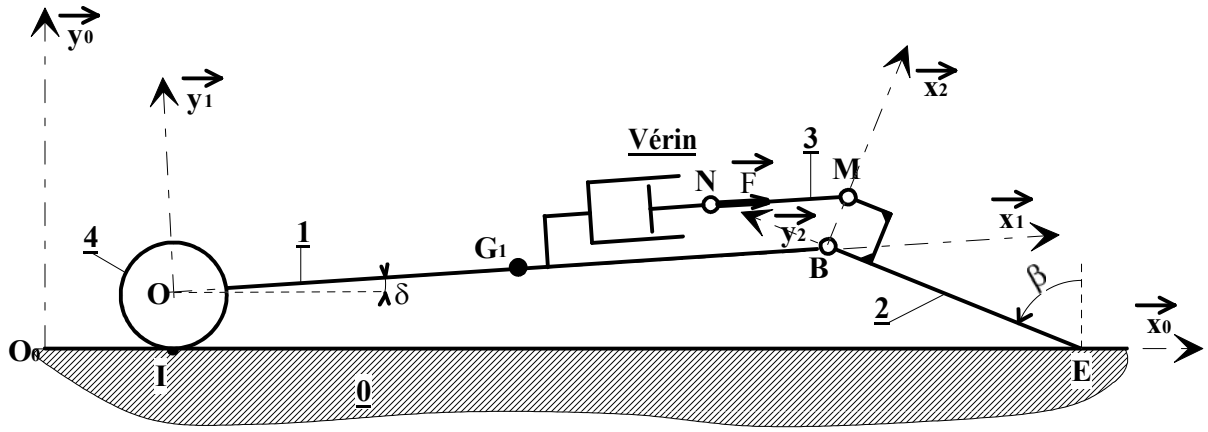


Figure 32

Hypothèses :

- L'étude dynamique est à faire dans le plan de symétrie longitudinal du robot.
- Le robot est modélisé selon le schéma ci-dessus. Il comprend :
  - Une tige **1**, de longueur OB = L_1, de section négligeable, de masse m_1, et de centre d'inertie G_1, tel que $\overrightarrow{OG_1} = \frac{L_1}{2}\vec{x}_1$.
  - Une roue **4**, de centre O, de rayon R = 0,07 m, de masse négligeable, qui correspond au train arrière. Cette roue est en liaison encastrement avec **1**.
  - Un bras **2** constitué de deux éléments BE et BM tels que $\vec{BE} = -a\,\vec{y}_2$ et $\vec{BM} = b\,\vec{x}_2$, de section et de masse négligeables.
  - Une biellette **3** (NM) de masse négligeable et dont la direction au cours du mouvement est sensiblement celle de la tige **1**.
  - Un vérin hydraulique de masse négligeable.
- En I, le contact entre la roue **4** et la paroi **0** se fait par roulement sans glissement.
- En E, le contact entre le bras **2** et la paroi **0** se fait sans frottement.
- L'action $\vec{F}$ du vérin sur la biellette **3** a, à chaque instant, pour direction $\vec{x}_1$: $\vec{F} = F\,\vec{x}_1$.

ANNEXE 6 – Page 2 / 2

Repères et paramétrage :

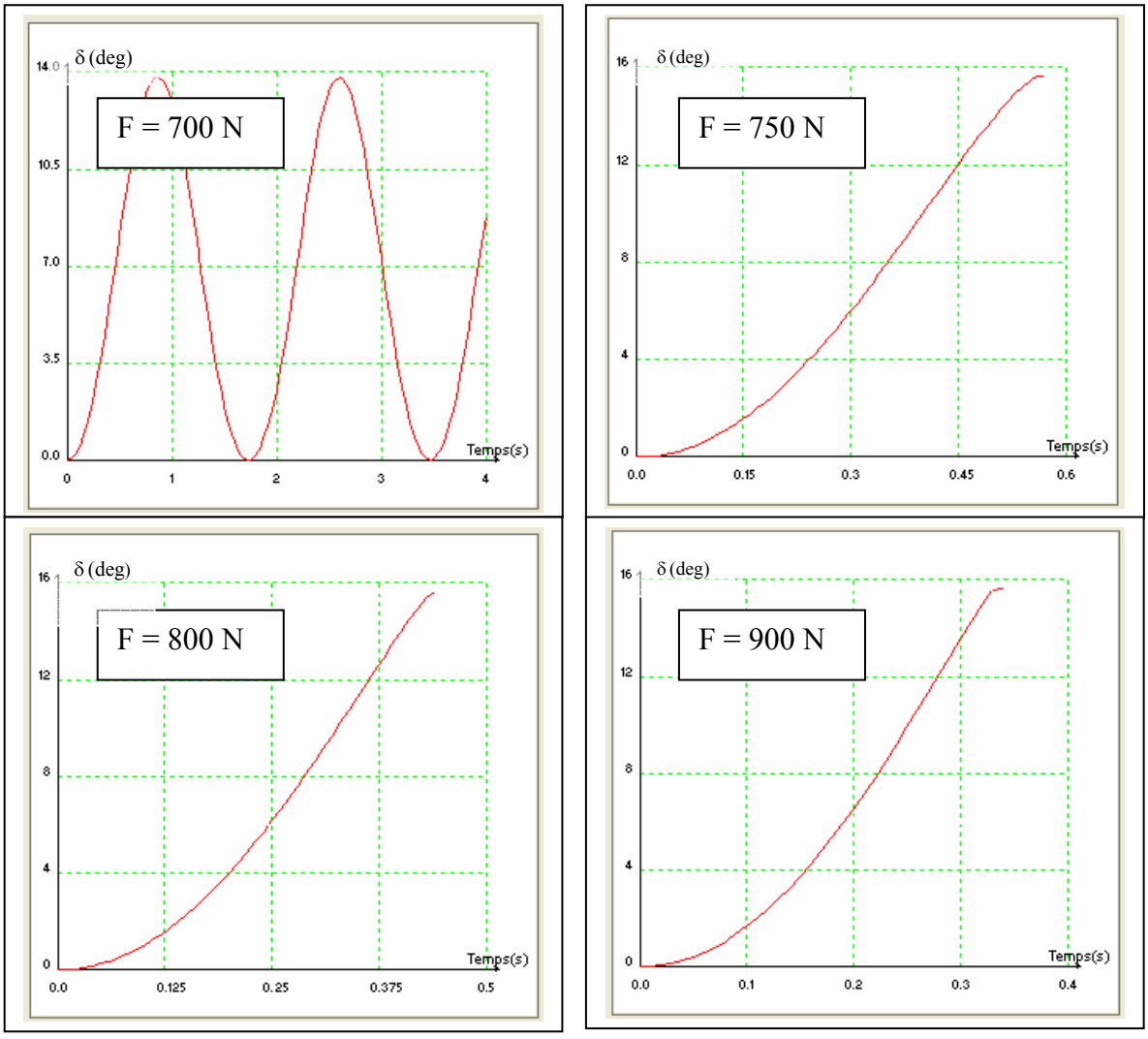
- $\mathcal{R}_0\ (\vec{x}_0, \vec{y}_0, \vec{z}_0)$ repère $\mathcal{R}_0$ associé à la canalisation **0**.
- $\mathcal{R}_1\ (\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$ repère $\mathcal{R}_1$ associé à la tige **1**.
- $\mathcal{R}_2\ (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ repère $\mathcal{R}_2$ associé au bras **2**.
- $\delta = (\vec{x}_0, \vec{x}_1) = (\vec{y}_0, \vec{y}_1)$; $\beta = (\vec{x}_0, \vec{x}_2) = (\vec{y}_0, \vec{y}_2)$

Cahier des charges : On désire avoir en fin de mouvement des bras, correspondant à $\delta = 14°$, une vitesse $\dot{\delta}$ inférieure à 50°/s.

Question 6 : En utilisant la modélisation et le paramétrage proposés, déterminer, par une étude dynamique, la relation entre l'effort F du vérin sur les bras et les paramètres de mouvement δ et β, et leurs dérivées.

Des simulations pour différentes valeurs de F donnent les diagrammes ci-dessous représentant l'évolution de δ en fonction du temps.

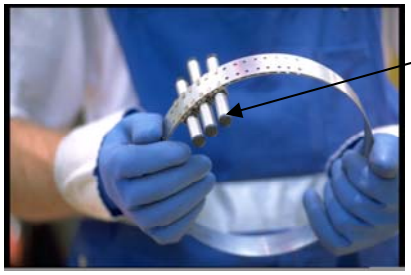
Question 7 : Pour chaque diagramme, analyser le comportement du robot.
Déterminer les vitesses $\dot{\delta}$ en fin de course.
En déduire les valeurs de F respectant le cahier des charges.



FICHE TECHNIQUE

Description des arceaux (ou brides) métalliques et des clips de fixation des gaines pour fibres optiques.

Les canalisations rencontrées ont un diamètre compris entre 200 et 700 mm. Les brides ont un diamètre adapté à celui de la canalisation.

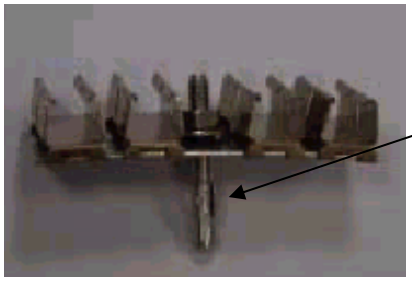


Portion de gaine pour la présentation

Figure 16

Arceau en position dans la canalisation →

Figure 17



Support de présentation

Figure 18

Clip de fixation des gaines

Gaines fixées sur l'arceau →

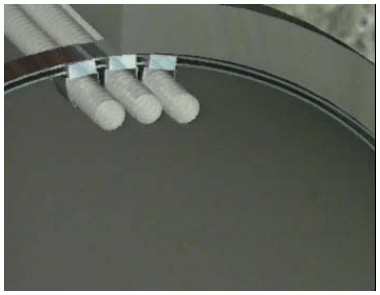


Figure 19

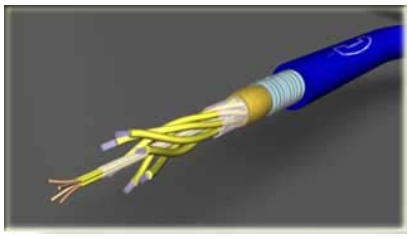


Figure 20

Fibres optiques

Fibres enfilées dans les gaines →

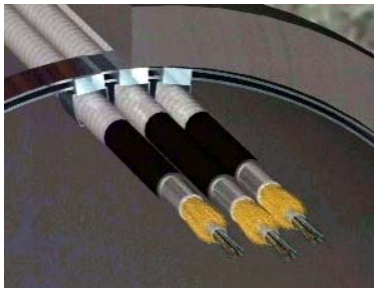
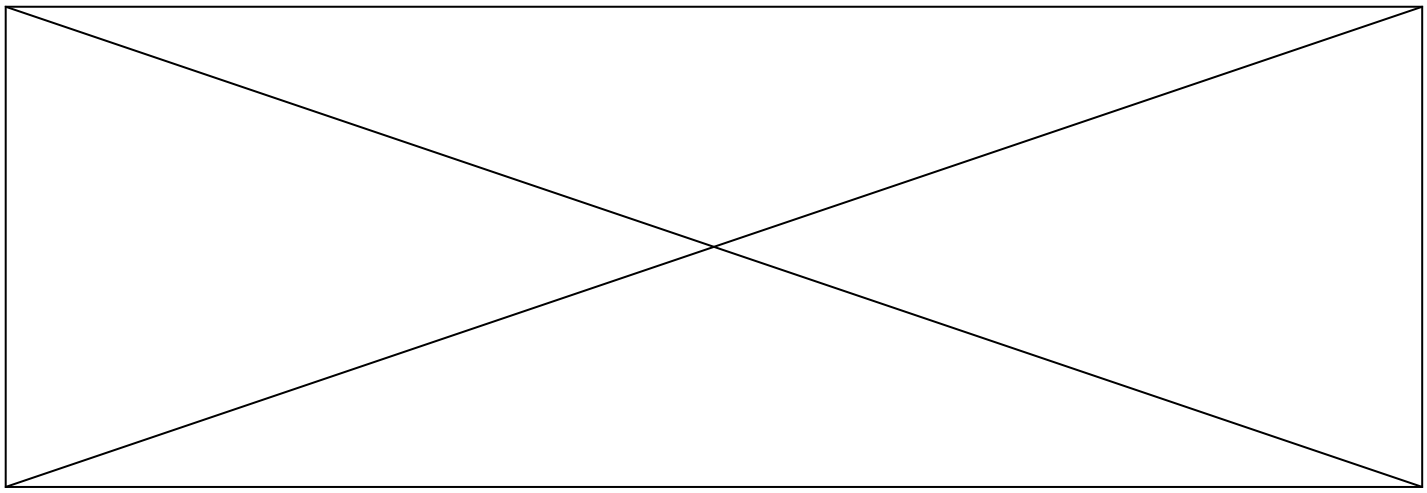
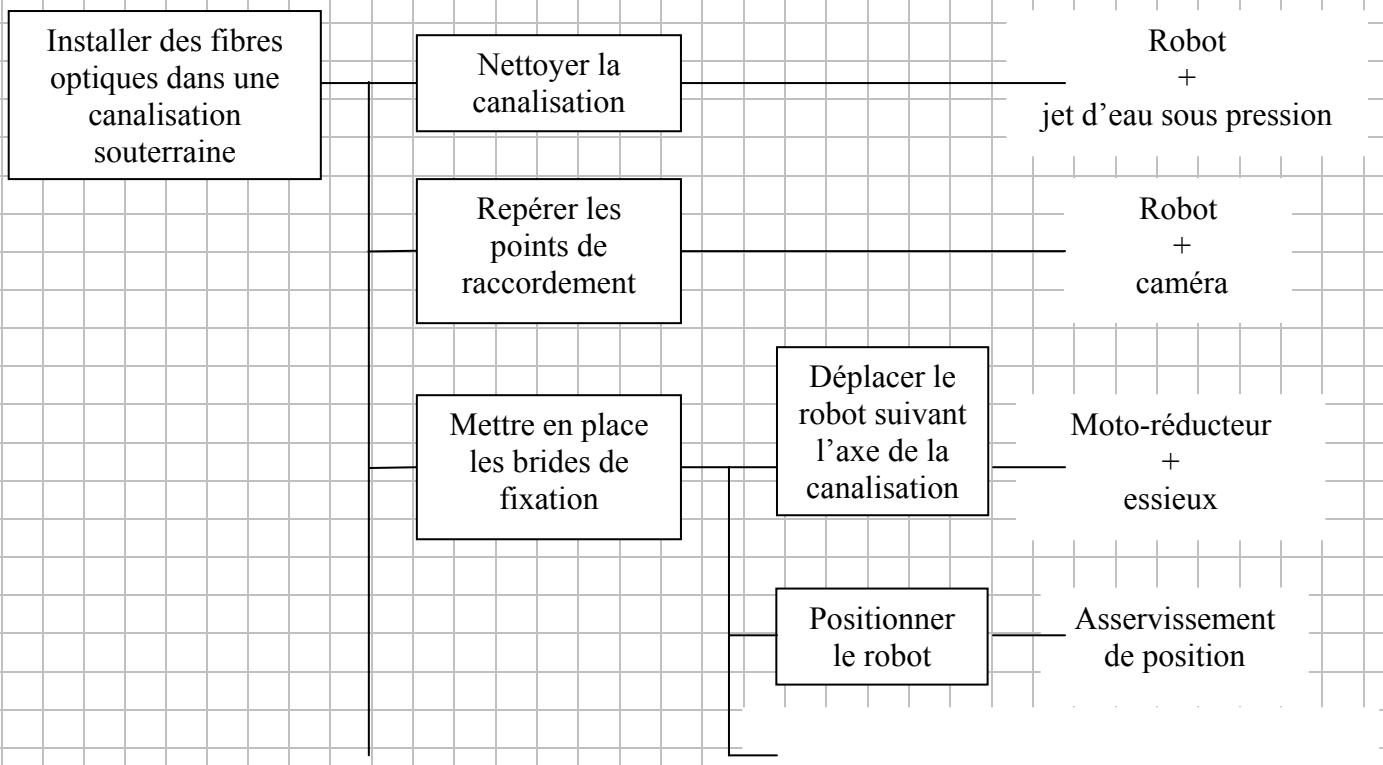


Figure 21

Tournez la page S.V.P.



<u>Question 1</u> : En utilisant le mode d'emploi du robot, compléter le diagramme FAST donné ci-dessus en faisant apparaître les fonctions manquantes ainsi que les processeurs associés à ces fonctions.


Installer des fibres optiques dans une canalisation souterraine
Nettoyer la canalisation
Robot + jet d'eau sous pression
Repérer les points de raccordement
Robot + caméra
Mettre en place les brides de fixation
Déplacer le robot suivant l'axe de la canalisation
Moto-réducteur + essieux
Positionner le robot
Asservissement de position

Question 2 : Après avoir déterminé la vitesse de rotation du moteur, calculer les nombres de dents des pignons R_2 et R_3 du réducteur épicycloïdal.

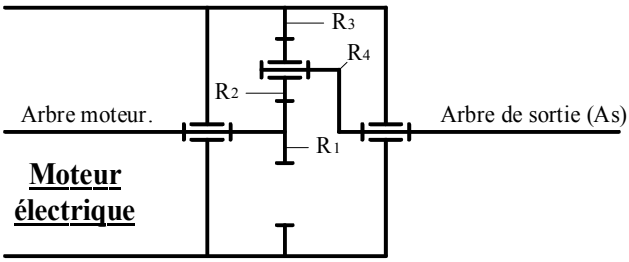
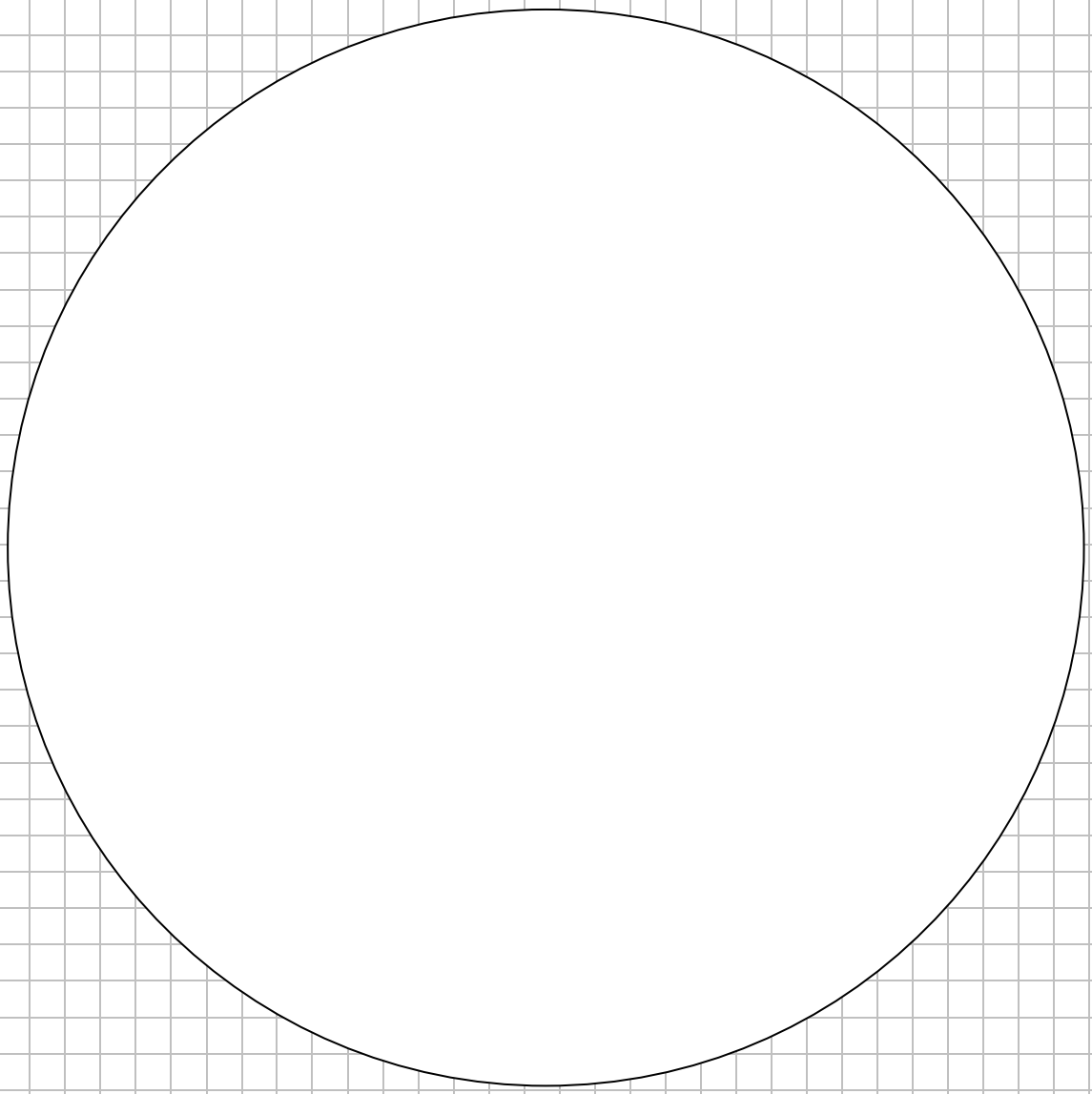
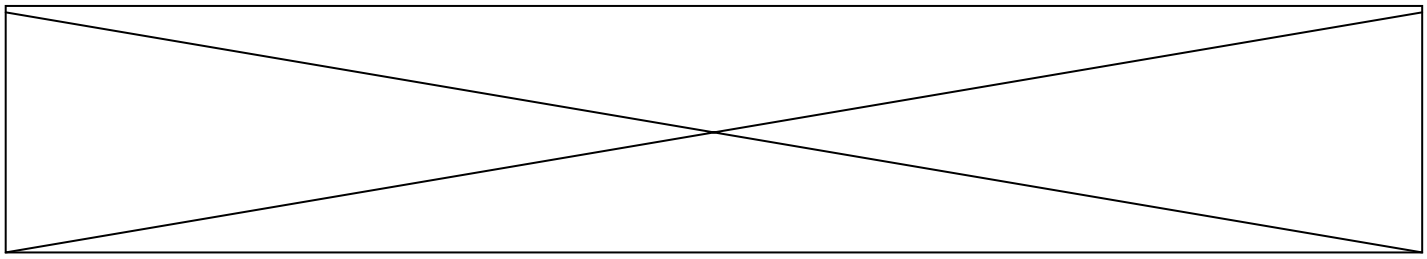


Schéma cinématique du réducteur épicycloïdal

Question 3 : Par une étude en statique, déterminer l'inclinaison maximum α du robot. L'étude sera conduite en utilisant la modélisation et le paramétrage proposés. Conclure quant au respect du cahier des charges. Analyser l'influence des paramètres φ et HG intervenant dans l'étude.

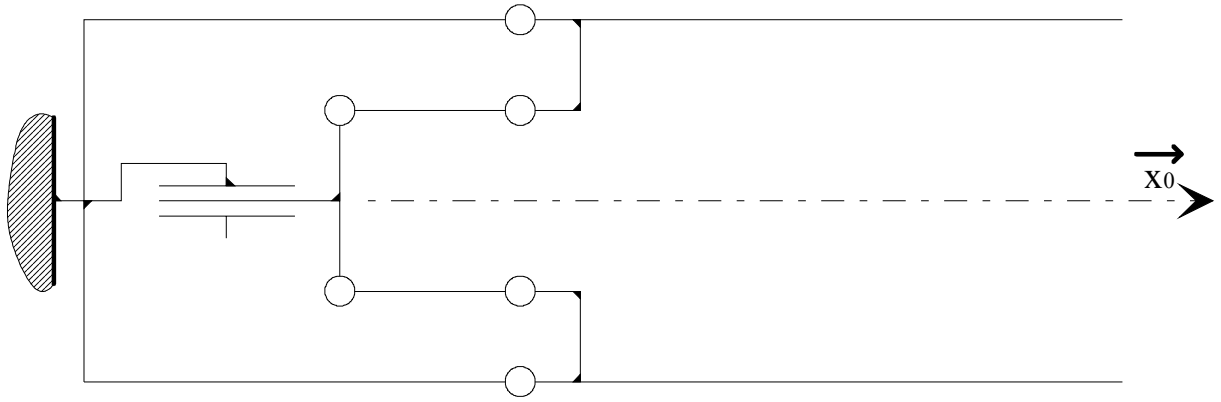


Question 4 : Représenter l'asservissement de déplacement du chariot sous la forme d'un schéma-blocs et déterminer les valeurs à donner à A pour avoir un réglage optimal de la boucle de vitesse ainsi qu'à C pour respecter les conditions de stabilité données par le cahier des charges.



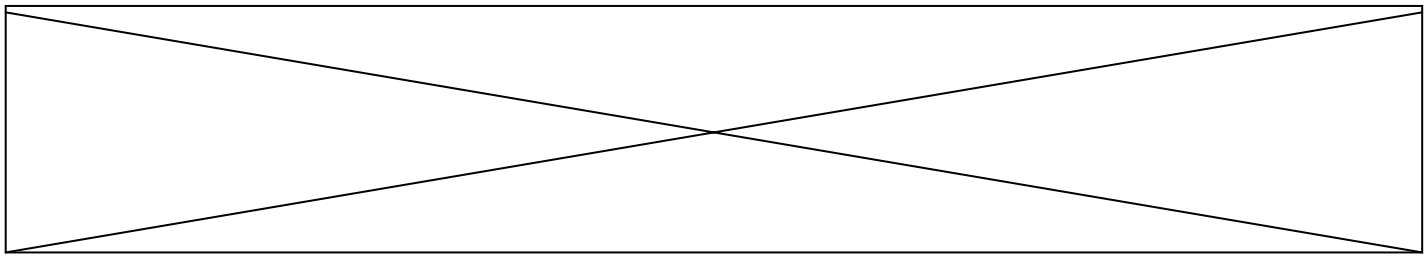
<u>Question 5</u> : Par une étude cinématique, déterminer la course de la tige du vérin de commande des bras de centrage ainsi que la vitesse des extrémités des bras inférieurs lorsqu'ils viennent en contact avec la canalisation.

Echelle : 0,2



Paroi de la canalisation

Question 6 : Déterminer par une étude dynamique la relation entre l'action F et les paramètres de mouvement δ et β et leurs dérivées.



Des simulations pour différentes valeurs de F donnent les diagrammes ci-dessous représentant l'évolution de δ en fonction du temps.

<u>Question 7</u> : Pour chaque diagramme donné ci-dessous, analyser le comportement du robot. Déterminer les vitesses $\dot{\delta}$ en fin de course. En déduire la valeur de F respectant le cahier des charges.